

混合遗传算法求解突防制导问题*

鲜 勇,斯文辉,冯 杰

(第二炮兵工程学院 603 教研室,西安 710025)

摘要:对弹道导弹中段机动突防制导问题进行了研究,提出设计了一种基于探测系统的机动规避突防方案.利用遗传算法结合单纯形法设计了在该方案下基于求解突防机动时机的一种突防制导律.建立了仿真系统,验证了该制导律的可行性.

关键词:机动突防;突防时机;遗传算法;单纯形法

中图分类号: T414.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2009)10-0087-03

近年来,美国发展的国家导弹防御系统日趋成熟,尤其是大气层外中段防御系统对我国战略核力量的威慑力形成了巨大的挑战.目前,战略导弹突防技术主要有:智能诱饵、机动变轨、滑翔弹道、多弹头分导、抗核加固等.作为专门对付大气层外杀伤拦截弹(exoatmospheric kill vehicle, EKV)的动能碰撞拦截的有效突防手段之一,弹道导弹弹头中段(自由段)机动规避技术,成为了国内外突防研究重点.随着优化算法在实际控制工程中的应用不断深入,单一的算法由于自身的局限性,在解决优化问题时,暴露出越来越多难以解决的问题,如优化参数容易陷入局部极小、优化时间过长、优化效果达不到实际控制工程的性能指标.因此本文中在对中段机动规避突防技术进行研究的基础上,利用遗传算法结合单纯形法设计了基于突防机动时机解算的机动制导律.

1 突防方案设计

本文中设计的中段机动规避突防方案是在远程弹道导弹飞行中段启动,方案主要内容:在突防方探测系统支持下,突防方实时获知对方 EKV 的速度位置信息,提前解算己方突防弹冲量机动最佳时机及最佳方向,形成突防指令;突防弹伺服机构获取突防指令后,控制脉冲喷射发动机在最佳机动时机进行冲量机动,完成突防.

2 攻防末段假设

为了方便研究,对突防弹、EKV 在攻防末段的状态进行合理假设:

假设 1:攻防双方处于零控拦截状态,即若双方不进行控制,按各自原弹道飞行即可拦截成功.可知该状态下是

最有利于 EKV 进行拦截情况,并且在拦截末段突防弹与 EKV 速度交会角接近于 0,近似于直线迎面碰撞.

假设 2: EKV 导引律采用扩展比例导引.文献[1]中表明对于一组特定的拦截动力学、性能指标和假设目标在未来时间里作直线飞行的终端约束中,比例导航是最优制导律.由于美国反导核心技术的严格保密, EKV 制导律具体形式未知,因此假设其采用扩展比例导引律模型具有一定合理性.

3 突防弹、EKV 运动模型

突防弹在自由段飞行时仅受到地球引力、柯氏力、牵连力的影响^[2],其动力学、运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x + \dot{V}_{ex} + \dot{V}_{cx} \\ g_y + \dot{V}_{ey} + \dot{V}_{cy} \\ g_z + \dot{V}_{ez} + \dot{V}_{cz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

EKV 在自由段飞行时除了受到地球引力、柯氏力、牵连力的影响外,还将受到自身轨控发动机提供的控制力,其带来的加速度为 a_E ,其动力学、运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x + \dot{V}_{ex} + \dot{V}_{cx} + a_{Ex} \\ g_y + \dot{V}_{ey} + \dot{V}_{cy} + a_{Ey} \\ g_z + \dot{V}_{ez} + \dot{V}_{cz} + a_{Ez} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

* 收稿日期:2009-08-10

作者简介:斯文辉(1986—),男,浙江诸暨人,硕士研究生,主要从事飞行器设计研究.

扩展比例导引律的导引方程为：

$$a_E = Kv_r \dot{\gamma} + \frac{K}{2} \dot{a}_m \tag{5}$$

$$\dot{a}_m(t) = r(t) \ddot{\gamma}(t) \tag{6}$$

其中： a_E 是 EKV 的轨控加速度； K 是比例导引系数； V_r 是导弹与 EKV 的接近速度； γ 是导弹与 EKV 的视线角； $\dot{\gamma}$ 是视线角速度； $\ddot{\gamma}$ 是视线角加速度； \dot{a}_m 是 EKV 对导弹的机动加速度的估计。

4 混合遗传算法求解突防制导问题

在施加的瞬时冲量^[3]大小、方向确定的情况下，突防制导问题的实质就是确定突防弹通过冲量机动能较好的完成突防任务的时机，主要表现为最佳冲量机动时机。

4.1 单纯形法用于局部搜索

单纯形法也称为可变多面体搜索算法，是一种传统的无约束最优化直接算法。传统的单纯形算法从解空间的一个初始单纯形出发，经过反射、扩张、压缩等运算改变单纯形法的顶点，可稳定搜索到问题的最优解。大量的研究和实践证明，在给定合适初值条件下，单纯形算法能以很高的精度收敛于初值附近的最优解。基于单一结构和机制的算法，一般难以实现高效优化，考虑到单纯形算法局部搜索能力极强以及遗传算法全局寻优的特点，将基本遗传算法与单纯形搜索算法结合形成了一种混合遗传算法，在继承基本遗传算法极强的全局搜索能力的基础上，克服了其局部搜索能力差的缺陷。在遗传算法进化操作之后，分别以子代群体的前 N 个优秀个体为初始点形成初始单纯形，进行单纯形局部搜索，从而搜索到各优秀个体在目前环境下所对应的局部最优解，并以此最优替换子代群体中相应的个体，形成新的子代种群以改善种群总体性能，从而达到提高算法局部搜索能力的目的。

4.2 编码与适应度选择

编码是应用遗传算法时要解决的首要问题，也是设计遗传算法时的一个关键步骤。

由于拦截末端 EKV 与突防弹的相对速度很大，大约在 10 km/s 左右^[4]，机动时机的小量变化都可能使突防效果产生很大差异，所以冲量机动时机选择问题需要较高精度。冲量机动时机 t 选择二进制编码较为简便。

在遗传算法中，以个体适应度的大小来确定该个体被遗传到下一代的概率。将冲量机动时机作为决策变量，首先需要针对不同机动时机的适应度进行评价。

脱靶量是评价突防效果最直接最有效的指标，不同的机动时机产生的脱靶量不同，且脱靶量的值总是非负的，所以可将冲量机动时机的适应度直接取为其对应的脱靶量。

4.3 遗传、交叉和变异^[5-6]

选择算子。采用比例选择算子，选择适应值较大的个体作为下一代的群体的父代。在优化问题当中，最优解可能在解空间的边界或在非可行解的附近，如果全部舍去非可行解则可能减少获得最优解的概率，因此在算法中以较小的概率

选择非可行解，与可行解一起进行交叉、变异操作。

交叉算子。采用单点交叉方式，随机挑选种群中 2 个个体作为交叉对象，并随机产生一个交叉点位置。

变异算子。随机选择群体中的个体并随机产生变异点位置，实现基因码的翻转，即 0 变为 1，1 变为 0。

4.4 最佳冲量机动时机优化模型

最佳冲量机动时机优化模型可用下式表示

$$\begin{cases} \max & r_t = f(t) \\ \text{s. t.} & t \in [t_0, t_f] \\ & p = p_0 \end{cases} \tag{7}$$

式中： r_t 为突防弹 $[t_0, t_f]$ 内 t 时刻实施冲量机动后 EKV 的脱靶量，即突防弹与 EKV 的最小相对距离。 r_t 的数值解算比较复杂，需要对突防弹、EKV 的动力学方程、运动学方程、相对运动方程以及 EKV 未制导方程等一系列变系数非线性常微分方程组同时进行解算，本文中不再具体展开。

另外， $p = p_0$ 代表了冲量大小一定、方向确定的含义，此时脱靶量的大小仅与冲量机动时机有关。

4.5 遗传算法解算最佳机动时机的具体步骤

- 1) 随机生成初始群体；
- 2) 对群体中的所有个体解码，得到参数 t (冲量机动时机)，代入突防弹弹道方程，进行攻防对抗仿真。完成对抗仿真计算后得到最终脱靶量并赋为适应度；
- 3) 进行遗传算法的遗传、变异和交叉等操作得到下一代的群体；
- 4) 从本代种群中选择适应度较大的个体进行单纯形法局部再寻优，并替代原个体；
- 5) 当遗传的代数达到给定代数时算法终止，否则转第 2 步；
- 6) 对最佳个体解码，计算得到最佳冲量机动时机。

5 仿真试验与分析

根据假设 1、2，并根据冲量最佳方向垂直于视线方向^[7-8]，因此重点对突防弹横向 (Z 向)、法向 (Y 向) 以及横法向双向进行冲量机动进行仿真。因此就冲量方向 (只考虑 Y 向和 Z 向)、大小 (考虑突防弹速度瞬时冲量大小为 10 m/s、20 m/s、40 m/s 的情况) 确定时，利用遗传算法对瞬时冲量与脱靶量、机动间隔实现 (可以通过机动成功突防的时间间隔) 以及最佳机动时机的关系进行仿真，冲量机动时机选择范围为 1 591 s 至 1 613.61 s。

为了更加有效地进行观察、分析，以瞬时冲量为 - 20 m/s 为例，Y、Z 向进行机动突防，记录每一时刻突防得到的最大脱靶量，得到的结果如图 3 和图 4。

通过对图 1 ~ 图 4 的分析可知，突防弹选取合理的时机在 Y、Z 中任一方向进行机动都能成功突防。在瞬时冲量大小和方向确定时，结合单向冲量机动的仿真结果可得到 Y 向机动突防效果要明显好于 Z 向机动的结论。在冲量方向确定的情况下，机动间隔随施加的瞬时冲量的增大而增大。在瞬时冲量大小相同的情况下，Y 向实现成功突防的时

间间隔和最佳机动时机所对应的脱靶量相比 Z 向要大. 由图 3~图 4 可知,无论是 Y 向机动还是 Z 向机动,其最佳机动时机均集中在 1 610 s 之后.

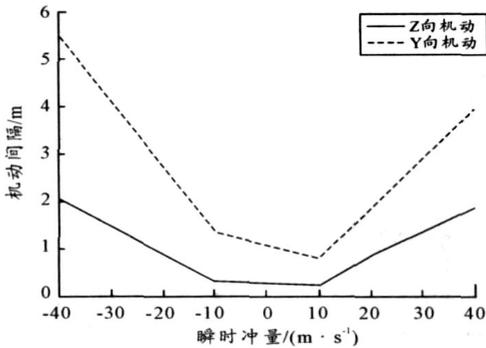


图 1 不同瞬时冲量对应的机动间隔

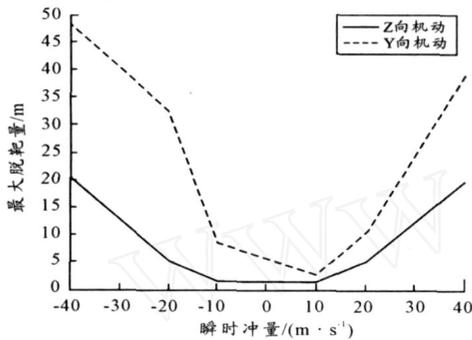


图 2 不同瞬时冲量对应的最大脱靶量

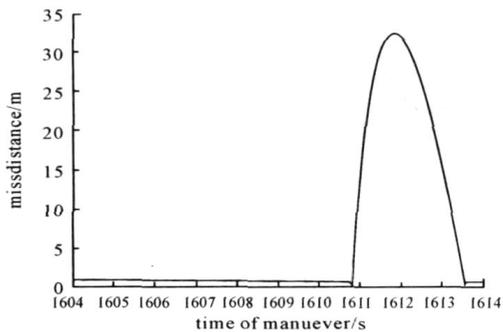


图 3 Y 向不同机动时机对应的最大脱靶量
(瞬时冲量为 - 20 m/s)

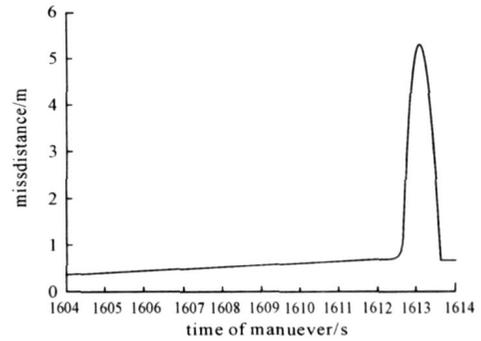


图 4 Z 向不同机动时机对应的最大脱靶量
(瞬时冲量为 - 20 m/s)

6 结束语

本文中对战略导弹中段机动规避 EKV 进行研究,利用遗传算法结合单纯形法局部搜索的混合算法来求解突防机动时机,保证遗传算法对全局寻优的同时,利用单纯形法提高了搜索局部最优解的效率.最后通过仿真试验验证了该算法的可行性.

参考文献:

- [1] Gerald M. Anderson. Comparison of optimal Control and Differential Game Intercept Missile Guidance Laws. AIAA 79 - 1736R.
- [2] 张毅,肖龙旭,王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2005.
- [3] 吴启星,张为华. 弹道导弹中段机动突防研究[J]. 宇航学报,2006(6):1243 - 1247.
- [4] 袁俊. 美国国家导弹防御系统发展概貌[J]. 飞航导弹,2001(3):23 - 27.
- [5] 曹伟华,焦红革,魏建辉. 遗传算法在武器目标分配中的应用[J]. 四川兵工学报,2008(5):119 - 121.
- [6] 杨尚达,李世平. 遗传算法研究[J]. 兵工自动化,2008(9):60 - 62.
- [7] 雍恩米,唐国金,罗亚中. 弹道导弹中段机动突防制导问题的仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术,2005(4):13 - 18.
- [8] 韩京清. 拦截问题中的制导律[M]. 北京,国防工业出版社,1977.